

大连理工大学教授学术丛书

随机波浪及其 工程应用

*Random Wave and Its Applications
to Engineering*

(第三版)

俞聿修 著



1023147

大连理工大学教授学术丛书

随机波浪及其工程应用

俞聿修 著



淮阴师院图书馆1023147

大连理工大学出版社

© 俞聿修 2003

图书在版编目(CIP)数据

随机波浪及其工程应用 / 俞聿修著. —3 版. —大连: 大连理工大学出版社, 2003.11

大连理工大学教授学术丛书

ISBN 7-5611-0466-9

I. 随… II. 俞… III. 不规则波—随机过程—研究
IV. P731.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 53651 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市凌水河 邮政编码: 116024

电话: 0411-4708842 传真: 0411-4701466 邮购: 0411-4707961

E-mail: dutp@mail.dlptt.ln.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连海事大学印刷厂印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 140 mm × 203 mm 字数: 336 千字 印张: 13.375 插页: 4

印数: 4 001 ~ 5 000

1992 年 1 月第 1 版

2003 年 11 月第 3 版

2003 年 11 月第 3 次印刷

责任编辑: 杨永生 李 鸽

责任校对: 佚 君

封面设计: 孙宝福

定价: 35.00 元

前 言

波浪作用是海岸工程、海洋工程和船舶上的主要荷载。很久以前,人们就开始采用流体力学的方法研究波浪,建立了多种波浪理论。总的趋势是由线性理论向非线性理论发展,提出了微幅波、斯笃克斯波、孤立波、椭圆波和流函数波浪理论等等,并由低阶向高阶发展。但几乎所有这些理论都把波浪看做是一种理想的规则波动,其参数(波高、波长和周期)是固定不变的。这种理想化的波浪可称之为规则波。这些理论可用来解释波浪运动的不少重要现象、基本概念和解决一些实际问题,至今仍然起着重大的作用。然而,自然界中的海浪是一种非常复杂的物理现象。海浪是由风产生的,由于风速风向多变,海面附近的风场结构复杂,波面对风场还具有反作用,再加上波浪内部涡动、波面破碎等等因素,使得海浪成为一种高度不规则的和不可重复的现象,实际上是一种不规则波浪或随机波浪。大量事实证明,只有按不规则波(或随机波)来研究海浪,才能正确地描述海浪,才能把海岸工程、海洋工程等设计得更加安全、经济、合理。

斯维尔特洛普(Sverdrup)和孟克(Munk)在第二次世界大战期间首先提出了有效波高的概念,并用于预报风浪,开创了不规则波研究的先河。50年代初,皮尔森(Pierson)最先把瑞斯(Rice)关于无线电噪声的理论应用于海浪,与纽曼(Neumann)等提出了能量谱(海浪谱)的概念,并用于海浪预报。从此利用谱以随机过程描述海浪逐步成为主要研究途径,并发展成方向谱。朗盖脱-赫金斯(Longuet-Higgins)研究了海浪的概率分布理论,提出了包括极值

在内的各波要素的概率预报方法。还有很多学者在这方面进行了大量的研究,并用于工程实际。现在,随机波浪(不规则波浪)理论已广泛地应用于海浪预报、船舶设计、海洋工程和海岸工程设计中。1979年,日本由运输省港湾局主编、港湾协会出版的《港湾设施技术标准及编制说明》比较全面地引进了不规则波的概念,大幅度地采用了不规则波设计法。西方先进工业国家也多要求采用不规则波浪进行模型试验。我国《港口工程技术规范》已确立了积极稳妥地采用不规则波设计法的方针,并大力实施。1998年出版的交通部《海港水文规范》,大量地采用了不规则波浪的研究成果。新修订的《波浪模型试验规程》也已将不规则波试验作为主要的试验方法。

本书内容分四部分,第一部分是随机海浪的理论基础,包括随机过程、随机过程的谱分析、线性系统分析和不规则波浪要素统计分析等四章。第二部分是海浪谱,介绍了海浪谱的基本概念、特性及其表达式,海浪谱的观测和分析方法(第五、六章)。第三部分为不规则波的模拟和波浪的传播与变形(第七、八章)。第四部分为不规则波对工程的作用(第九章)。全书比较系统地论述了随机海浪的理论基础及其实际应用。内容力求理论联系实际,在广泛介绍国外研究成果(包括90年代成果)的同时,着重论述我国的最新成果。较多地论述了笔者及其同事们的研究成果。在重点介绍不规则波方法的同时,对大家比较熟知的规则波方法,也作为考虑不规则波作用的代表波法加以介绍。还结合1998年版《海港水文规范》中的新内容,对波浪的传播和变形,波浪对工程的作用等做了比较详细的论述。

由于随机波浪理论比较年轻,加上笔者水平有限,书中一定有不少不妥甚至错误之处,祈请批评指正。

俞聿修

1999年7月

目 录

前言

第一章 随机过程..... 1

1.1 随机过程的概念 1

1.2 随机过程的统计特征及其运算 2

1.3 平稳随机过程..... 11

1.4 平稳随机过程的各态历经性..... 13

1.5 正态随机过程..... 17

1.6 随机函数的变换..... 19

参考文献 22

第二章 随机过程的谱分析 23

2.1 谱密度函数..... 23

2.2 自相关函数..... 26

2.3 维纳—辛钦定理..... 27

2.4 窄带谱和宽带谱随机过程..... 31

2.5 互谱密度函数..... 37

参考文献 44

第三章 线性系统分析 45

3.1 线性系统和非线性系统..... 45

3.2 线性系统对输入特征的变换..... 47

3.3 线性系统对输入的反应..... 49

3.4 输入谱、输出谱和互谱之间的关系 54

3.5 传递函数的确定方法..... 58

参考文献 66

第四章 不规则波浪要素的统计分布	67
4.1 波浪要素和特征波的定义	67
4.2 波高的分布	70
4.3 最大波高的分布	78
4.4 波面极大值的分布	83
4.5 波浪周期的分布	88
4.6 波高与周期的联合分布	94
4.7 波群	97
4.8 海浪的非线性及其统计量的变动性	113
4.9 波浪的长期分布	121
参考文献	128
第五章 海浪谱及其表达式	131
5.1 用谱描述波动海面	131
5.2 海浪频谱的一般形式与特征	136
5.3 无限风距的海浪谱	139
5.4 JONSWAP 谱和 Wallops 谱	148
5.5 浅水风浪谱和涌浪谱	153
5.6 我国的海浪谱	155
5.7 海浪谱的无因次化	162
5.8 方向谱	165
5.9 谱与海浪要素的关系	174
参考文献	176
第六章 海浪谱的估计	179
6.1 基本概念	179
6.2 由相关函数估计频谱	181
6.3 快速傅里叶变换算法估计谱	189
6.4 最大熵法估计谱	197
6.5 方向谱的观测与分析	199

参考文献	218
第七章 不规则波浪的模拟	221
7.1 概述	221
7.2 不规则波浪的数值模拟——模拟频谱	221
7.3 不规则波浪的数值模拟——模拟波列	230
7.4 波群的模拟	232
7.5 不规则波的物理模拟	240
7.6 多向不规则波的模拟	250
7.7 非线性波浪的模拟	259
参考文献	267
第八章 波浪的传播与变形	269
8.1 概述	269
8.2 波浪的浅水效应	271
8.3 波浪折射	273
8.4 波浪绕射	276
8.5 波浪反射	293
8.6 波浪破碎	301
参考文献	308
第九章 不规则波浪对工程的作用	312
9.1 概述	312
9.2 波浪与直墙堤的相互作用——代表波法	313
9.3 波浪对斜坡式建筑物的作用	332
9.4 波浪爬高及越浪	335
9.5 单个小尺度桩柱上的波浪力	348
9.6 作用于群桩上的波浪力	382
9.7 大直径墩柱上的不规则波浪力	395
参考文献	403

附录	408
附表 1 波长计算表	408
附表 2 波长、波速计算表	410
附录 3 附录 4 附录 5 附录 6 附录 7 附录 8 附录 9 附录 10 附录 11 附录 12 附录 13 附录 14 附录 15 附录 16 附录 17 附录 18 附录 19 附录 20 附录 21 附录 22 附录 23 附录 24 附录 25 附录 26 附录 27 附录 28 附录 29 附录 30 附录 31 附录 32 附录 33 附录 34 附录 35 附录 36 附录 37 附录 38 附录 39 附录 40 附录 41 附录 42 附录 43 附录 44 附录 45 附录 46 附录 47 附录 48 附录 49 附录 50 附录 51 附录 52 附录 53 附录 54 附录 55 附录 56 附录 57 附录 58 附录 59 附录 60 附录 61 附录 62 附录 63 附录 64 附录 65 附录 66 附录 67 附录 68 附录 69 附录 70 附录 71 附录 72 附录 73 附录 74 附录 75 附录 76 附录 77 附录 78 附录 79 附录 80 附录 81 附录 82 附录 83 附录 84 附录 85 附录 86 附录 87 附录 88 附录 89 附录 90 附录 91 附录 92 附录 93 附录 94 附录 95 附录 96 附录 97 附录 98 附录 99 附录 100	410

Contents

Preface

Chapter 1 Random process	1
1.1 Concept of random process	1
1.2 Statistical characteristics of random process and its computation	2
1.3 Stationary random processes	11
1.4 The ergodicity of a stationary random process	13
1.5 Normal random process	17
1.6 Transformation of random function	19
References	22
Chapter 2 Spectral analysis of random process	23
2.1 Spectral density function	23
2.2 Auto-correlation function	26
2.3 Wiener-Khintchine Theorem	27
2.4 Random process of narrow-band spectrum and wide-band spectrum	31
2.5 Cross spectral density function	37
References	44
Chapter 3 Linear system analysis	45
3.1 Linear system and non-linear system	45
3.2 Transformation of input properties in linear system	47

3.3	Response of linear system to input	49
3.4	Relationship among input, output and cross spectral density function	54
3.5	Evaluation of transfer function	58
	References	66

Chapter 4 Statistical distribution of irregular

	wave parameters	67
4.1	Wave parameters and the definition of characteristic waves	67
4.2	Statistical distribution of wave height	70
4.3	Statistical distribution of maximum wave height	78
4.4	Statistical distribution of maxima of wave surface	83
4.5	Statistical distribution of wave period	88
4.6	Joint probability of wave height and period	94
4.7	Wave groups	97
4.8	Non-linearity and statistical variability of sea waves	113
4.9	Long-term wave statistics	121
	References	128

Chapter 5 Sea wave spectrum and its formulations

5.1	Describing sea wave with spectrum	131
5.2	General form and properties of sea wave frequency spectrum	136
5.3	Spectral formulation for open sea	139
5.4	JONSWAP spectrum and Wallops spectrum	148
5.5	Wind wave spectrum in shallow water and	

swell spectrum	153
5.6 Sea wave spectrum in China	155
5.7 Nondimensional form of sea wave spectrum	162
5.8 Directional spectrum	165
5.9 Relationship between spectrum and wave parameters	174
References	176
Chapter 6 Evaluation of wave spectrum	179
6.1 Basic concept	179
6.2 Evaluation of frequency spectrum from auto-correlation function	181
6.3 Evaluation of spectrum with FFT	189
6.4 Evaluation of spectrum with MEM	197
6.5 Observation and analysis of directional spectrum	199
References	218
Chapter 7 Irregular wave simulation	221
7.1 Introduction	221
7.2 Numerical simulation of irregular waves— simulating frequency spectrum	221
7.3 Numerical simulation of irregular waves— simulating wave train	230
7.4 Simulation of wave groups	232
7.5 Physical simulation of irregular waves	240
7.6 Simulation of multi-directional irregular waves	250
7.7 Simulation of non-linear waves	259

References	267
Chapter 8 Wave propagation and transformation	269
8.1 Introduction	269
8.2 Wave shoaling	271
8.3 Wave refraction	273
8.4 Wave diffraction	276
8.5 Wave reflection	293
8.6 Wave breaking	301
References	308
Chapter 9 Irregular wave action on structures	312
9.1 Introduction	312
9.2 Interaction between wave and vertical breakwater — representative wave method	313
9.3 Wave action on sloping structures	332
9.4 Wave run-up and overtopping	335
9.5 Wave forces on an isolated pile	348
9.6 Wave forces on pile group	382
9.7 Wave forces on cylinder of large diameter	395
References	403
Appendix	408
Table 1 Computation table of wavelength	408
Table 2 Computation table of wavelength and celerity	410

第一章 随机过程

1.1 随机过程的概念

自然界的事物都是变化着的,我们过去在经典物理学中研究的事物变化形式,多把它们看做是可以确知的。例如自由落体运动的速度 $v(t) = gt$; 静水压力随水深变化规律 $p(z) = \gamma z$ 等等,它们可用确定的函数予以描述。称之为确定性过程 (Deterministic process)。

另一种过程(例如海浪)是在空域上和时域上高度不规则的和不重复的物理现象,其变化形式是预先无法确知的,但是通过每次测验,可测得一个确定的结果,虽然每次实测结果彼此是不相同的。这种变化必须用随机函数加以描述,也叫做随机过程。技术领域中遇到的随机函数的例子很多,如风速、海浪、变速水流、地震等。其实,如测量系统、控制系统、调节系统等,在分析系统工作的精确性时,也必须考虑随机干扰的存在,干扰本身以及由它所引起的系统的反应都是时间的随机函数。

测量随机过程所得的结果叫做一个现实(或叫样本函数),它是确定的非随机函数,但各个现实各不相同。因此,为了得到随机过程的统计特性,必须对它作大量的(n 次)独立测量。如图 1.1.1 所示,在同一条件的海域内,布置 n 个同一类型的波高仪,可同时测得 n 个记录 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, 得到 n 个现实(或 n 个样本函数),总称为总体[或样集 $X(t), \text{Ensemble}$]。在某个固定时刻 t_1 , 可读得各样本的瞬时波面高度 $x_1(t_1), x_2(t_1) \dots, x_n(t_1)$, 它们是一组

通常的随机变量(Random variable)。在时刻 $t_1 + \tau$, 可得另一组随机变量 $x_1(t_1 + \tau), x_2(t_1 + \tau), \dots, x_n(t_1 + \tau)$, 依此类推。因此我们也可以这样来定义随机函数: 对自变量的每一个给定值(例如 $t = t_1$), 函数 $X(t)$ 的值(与 $t = t_1$ 相对应的每一个截面)为随机变量, 这样的函数称为自变量 t 的随机函数。也可以说, 随机函数是随机变量随时间的变化, 是随机变量系的推广。因此, 可近似地用研究多元随机变量来代替研究随机函数。但如以后将讲到的那样, 通常问题可得到简化。

随机函数的自变量 t 并非一定是时间, 而且可以不只是一个自变量。

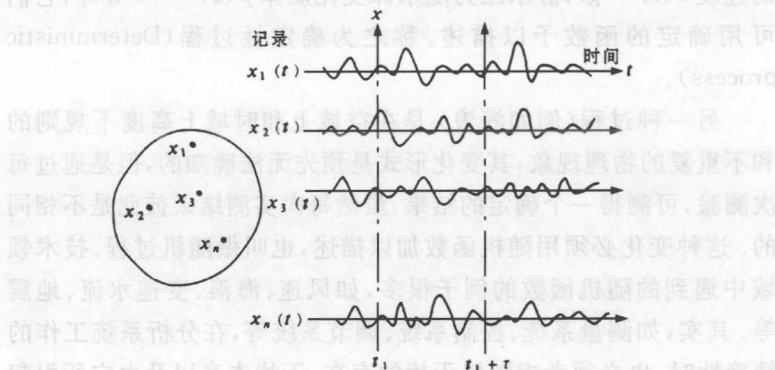


图 1.1.1 在 n 个点同步测得 n 个现实

1.2 随机过程的统计特征及其运算

一、随机变量的特征值

在研究随机过程的统计特征之前, 先简述随机变量 X 的特征及其运算。

1. 均值(Mean value) 及其特性

$$m_x = E[X] = \begin{cases} \sum_s x_i p(x_i) & \text{离散随机变量} \\ \int_s x f(x) dx & \text{连续随机变量} \end{cases} \quad (1.2.1)$$

式中, $p(x_i)$ 为 x_i 的概率质量函数; $f(x)$ 为概率密度函数。均值为随机变量的一阶原点矩。

如通过随机实验得到一系列独立的观测值: $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其样本均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.2)$$

均值具有以下特性:

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad E[a] &= a & a \text{ 为常数} \\ (2) \quad E[aX] &= aE[X] \\ (3) \quad E[X + a] &= E[X] + a \\ (4) \quad E[X + Y + Z + \dots] &= E[X] + E[Y] + E[Z] + \dots \\ (5) \quad E[XYZ\dots] &= E[X]E[Y]E[Z]\dots \end{aligned} \right\} \quad (1.2.3)$$

式中, X, Y, Z 为相互独立的随机变量。否则式(5)不成立。

2. 方差(Variance) 及其特性

方差:

$$D[X] = \sigma_x^2 = E[(x - m_x)^2] = \begin{cases} \sum_s (x_i - m_x)^2 p(x_i) & \text{离散随机变量} \\ \int_s (x - m_x)^2 f(x) dx & \text{连续随机变量} \end{cases} \quad (1.2.4)$$

样本方差(Sample variance):

$$D[X] = \sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.2.4a)$$

σ 称为标准差 (Standard deviation); $\bar{x}$ 为 X 的样本均值。

方差表明随机变量偏离其均值的程度, 等于随机变量的二阶中心矩。

一般只要均值和方差两个参数即可表征随机变量的特性。

方差的特性:

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad D[X] &= E[X^2] - (E[X])^2 \\ (2) \quad D[a] &= 0 \quad \text{此处 } a \text{ 为常数} \\ (3) \quad D[aX] &= a^2 D[X] \\ (4) \quad D[a + X] &= D[X] \\ (5) \quad D[aX + bY] &= a^2 D[X] + b^2 D[Y] \quad X \text{ 和 } Y \text{ 是相互独立的} \\ &= a^2 D[X] + b^2 D[Y] + 2ab \operatorname{Cov}[X, Y] \quad X \text{ 和 } Y \text{ 是相关的} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.5)$$

$\operatorname{Cov}[X, Y]$ 称为 X 和 Y 的协方差, 见下述。

此处仅对上述特性(1) 予以证明:

$$\begin{aligned} D[X] &= E[(X - m_x)^2] \\ &= E[X^2 - 2m_x X + m_x^2] \\ &= E[X^2] - 2m_x E[X] + m_x^2 \\ &= E[X^2] - (E[X])^2 \end{aligned}$$

3. 协方差 (Covariance)

两个随机变量之间的协方差表征它们之间的相关性, 有如下定义:

$$\begin{aligned} \operatorname{Cov}[X, Y] &= E[(X - m_x)(Y - m_y)] \\ &= E[XY] - E[X]E(Y) \end{aligned} \quad (1.2.6)$$

协方差是两个随机变量的二阶中心混合矩。上式右边第一项是 X , Y 的二阶原点混合矩, 叫做 X, Y 的相关矩, 用 R_{xy} 表示, 即

$$\operatorname{Cov}[X, Y] = R_{xy} - m_x m_y \quad (1.2.7)$$

$$R_{xy} = E[XY] \quad (1.2.8)$$